

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-237310

(43)公開日 平成11年(1999)8月31日

(51)Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

FI

G 0 1 M 11/02

G 0 1 M 11/02

B

11/00

11/00

L

G 0 3 F 7/20

5 0 1

G 0 3 F 7/20

5 0 1

H 0 1 L 21/027

H 0 1 L 21/30

5 0 2 V

5 1 6 A

審査請求 未請求 請求項の数4 OL (全10頁)

(21)出願番号

特願平10-37473

(22)出願日

平成10年(1998)2月19日

(71)出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72)発明者 野村 博

神奈川県横浜市磯子区新杉田町8番地 株

式会社東芝横浜事業所内

(72)発明者 佐藤 和也

神奈川県横浜市磯子区新杉田町8番地 株

式会社東芝横浜事業所内

(74)代理人 弁理士 鈴江 武彦 (外6名)

(54)【発明の名称】 レンズの収差測定方法

(57)【要約】

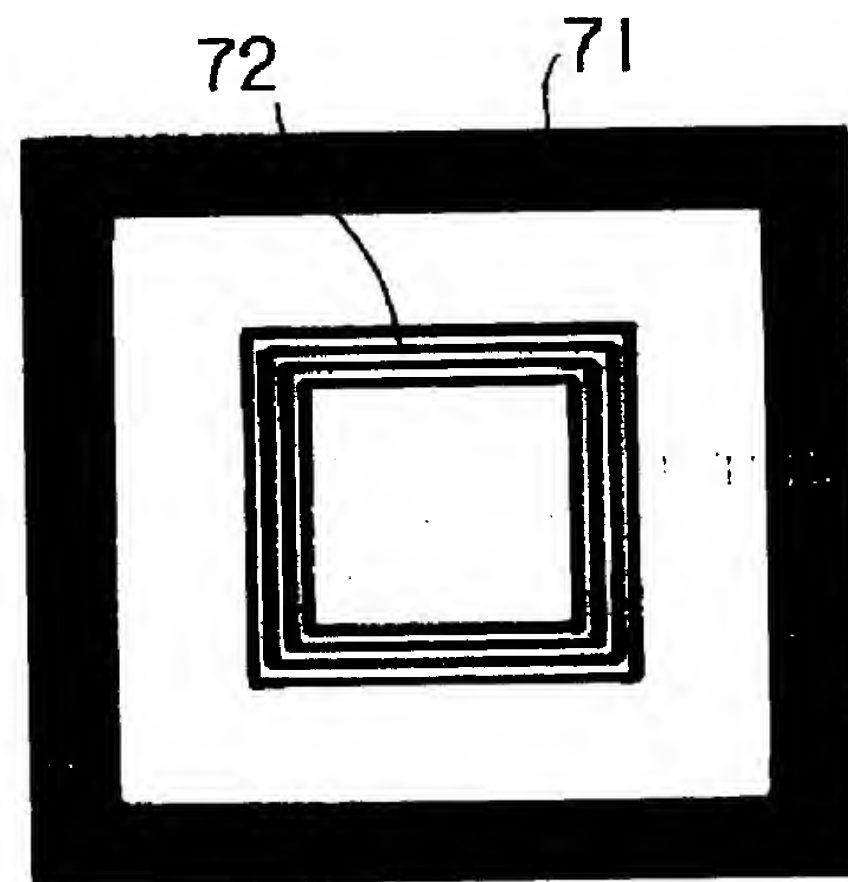
【課題】 レンズ収差の絶対評価を精度良く行う。

【解決手段】 基板上に転写されたパターンの周期が式1の条件を満たし且つホトマスク上でのライン幅とスペース幅がほぼ1対1である周期パターン又は基板上に転写されたパターンの周期が式2の条件を満たす周期パターンからなる第1のパターン72と、この第1のパターンの1周期の幅よりもパターン幅が広い第2のパターン71とにより評価パターンを構成し、

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 3\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式1)$$

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 2\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式2)$$

基板上に同時に転写された第1のパターンと第2のパターンの位置の差を測定する。ただし、Pは第1のパターンの1周期の幅、NAは投影レンズの開口数、λは照明光の波長、σは照明光学系のコヒーレンスファクターである。



1

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 ホトマスク上に形成されたパターンに照明光学系を介して照明光を照射し、このホトマスク上のパターンに対応して投影光学系により基板上に転写される評価パターンを測定することにより投影光学系の投影レンズの収差を測定する方法において、

前記評価パターンは、基板上に転写されたパターンの周\*

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 3\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式1)$$

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 2\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式2)$$

P：第1のパターンの1周期の幅

NA：投影レンズの開口数

$\lambda$ ：照明光の波長

$\sigma$ ：照明光学系のコヒーレンスファクター

前記基板上に同時に転写された第1のパターンと第2のパターンの位置の差を求めることを特徴とするレンズの収差測定方法。

【請求項2】 ホトマスク上に形成されたパターンに照明光学系を介して照明光を照射し、このホトマスク上のパターンに対応して投影光学系により基板上に転写される※

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 3\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式1)$$

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 2\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式2)$$

P：第1のパターンの1周期の幅

NA：投影レンズの開口数

$\lambda$ ：照明光の波長

$\sigma$ ：照明光学系のコヒーレンスファクター

前記基板上に同時に転写された複数種類の第1のパターンの位置の差を求めることを特徴とするレンズの収差測定方法。

【請求項3】 ホトマスク上に形成されたパターンに照明光学系を介して照明光を照射し、このホトマスク上のパターンに対応して投影光学系により基板上に転写される★

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 3\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式1)$$

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 2\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式2)$$

P：第1のパターンの1周期の幅

NA：投影レンズの開口数

$\lambda$ ：照明光の波長

$\sigma$ ：照明光学系のコヒーレンスファクター

前記基板上に同時に転写された複数種類の第1のパターンのジャストフォーカス位置のフォーカス差を求めることを特徴とするレンズの収差測定方法。

【請求項4】 ホトマスク上に形成されたパターンに照明光学系を介して照明光を照射し、このホトマスク上のパターンに対応して投影光学系により基板上に転写される☆

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 3\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式1)$$

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 2\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式2)$$

P：第1のパターンの1周期の幅

NA：投影レンズの開口数

$\lambda$ ：照明光の波長

$\sigma$ ：照明光学系のコヒーレンスファクター

前記基板上に同時に転写された複数種類の第1のパター

2

\*期が式1の条件を満たし且つホトマスク上でのライン幅とスペース幅がほぼ1対1である周期パターン又は基板上に転写されたパターンの周期が式2の条件を満たす周期パターンからなる第1のパターンと、この第1のパターンの1周期の幅よりもパターン幅が広い第2のパターンとを有するものであり、

10 ※評価パターンを測定することにより投影光学系の投影レンズの収差を測定する方法において、

前記評価パターンは、基板上に転写されたパターンの周期が式1の条件を満たし且つホトマスク上でのライン幅とスペース幅がほぼ1対1である周期パターン又は基板上に転写されたパターンの周期が式2の条件を満たす周期パターンの少なくとも一方からなる複数種類の第1のパターンを有するものであり、該複数種類の第1のパターンはそれぞれ異なる周期の周期パターンからなり、

★評価パターンを測定することにより投影光学系の投影レンズの収差を測定する方法において、

前記評価パターンは、基板上に転写されたパターンの周期が式1の条件を満たし且つホトマスク上でのライン幅とスペース幅がほぼ1対1である周期パターン又は基板上に転写されたパターンの周期が式2の条件を満たす周期パターンの少なくとも一方からなる複数種類の第1のパターンを有するものであり、該複数種類の第1のパターンはそれぞれ異なる周期の周期パターンからなり、

30

☆評価パターンを測定することにより投影光学系の投影レンズの収差を測定する方法において、

前記評価パターンは、基板上に転写されたパターンの周期が式1の条件を満たし且つホトマスク上でのライン幅とスペース幅がほぼ1対1である周期パターン又は基板上に転写されたパターンの周期が式2の条件を満たす周期パターンの少なくとも一方からなる複数種類の第1のパターンを有するものであり、該複数種類の第1のパターンはそれぞれ異なる方向に並んだ周期パターンからなり、

40

ンのジャストフォーカス位置のフォーカス差を求めることを特徴とするレンズの収差測定方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

50

【発明の属する技術分野】 本発明は、リソグラフィ工程

に用いられるレンズの収差測定方法に関するものである。

#### 【0002】

【従来の技術】半導体デバイスを作製するために用いられる縮小転写露光装置の投影レンズ収差を評価する方法として、現在様々な方法が提案され、実際の評価に用いられている。代表的な収差としては、以下に示す球面収差、非点収差、コマ収差があげられる。

【0003】球面収差は、転写するパターンの大きさによってフォーカスがずれる現象である。従って、球面収差の評価には、例えば0.25μmパターンに対するフォーカス位置と2.0μmパターンに対するフォーカス位置を測定し、両フォーカス差を球面収差の大きさを表す指標として用いることが多い。しかし、大きなパターンはフォーカス裕度が広い、即ち、広いフォーカス範囲で均一なパターン形成ができる為、逆に正確にベストフォーカス位置を決定することが難しい。

【0004】非点収差は、パターンの方向によってベストフォーカス位置がずれる現象である。この収差を評価する方法としては、[SPIE Vol. 1463 (1991), p. 294]で示される評価法が一般的に用いられている。この測定方法は、縦、横、斜め方向に向いたパターンをフォーカス条件を徐々に変えながら微小ステップで露光し、光学顕微鏡を用いて各方向で最も良好に解像しているフォーカス条件を比較する方法である。しかし、この評価法も球面収差の評価と同様に、パターンサイズが大きくなると高精度な測定が困難になる傾向がある。従って、限界解像度付近のサイズのパターンに対してしか有効ではない。

【0005】コマ収差は、パターンのサイズによって転写位置がずれる現象である。この収差の評価には、5本棒パターンの両端パターンで転写後のサイズに差が出る現象を利用し、このサイズ差を指標として一般に用いている。また、近年では、大きなパターンと小さなパターンの相対転写位置ずれを、重ね合せ検査装置を用いて測定する方法も行われている（特願平9-305917）。

【0006】以上述べてきた測定方法は、実際のデバイスパターンを露光する時に採用される照明条件や露光条件を用いて、実際のデバイスパターンに採用されるデザインルールに近い評価パターンを露光し、実際のデバイ \*

\*スパターンへの影響を評価する為に行われることが一般的である。

【0007】しかし、このような測定方法では、様々な収差が複雑に影響し合い、そこから得られた評価結果は、「パターンAよりもパターンBの方が収差の影響が小さい」とか「露光装置Aよりも露光装置Bの方が収差が小さい」と言った相対評価を示すことに止まっているのが現実である。

【0008】今日では投影レンズの収差による影響が無視できない状況にきている。従って、高精度な評価技術による投影レンズの性能強化もさることながら、収差を考慮した光学シミュレーションによるプロセスマージン予測に対する要求が大きくなりつつあり、従来の相対評価ではなく、絶対評価が収差評価にも強く求められている。ここで言う収差の絶対評価とは、何らかの収差の表現理論に基いて、各収差を表わす係数の絶対値を測定し、シミュレーションへの導入を可能にすることである。

#### 【0009】

【発明が解決しようとする課題】このように、従来のレンズ収差の測定方法は、収差の相対評価を行うに止まり、絶対評価を行うことができなかった。本発明は上記従来の課題に対してなされたものであり、レンズ収差の絶対評価を精度良く行うことが可能な測定方法を提供することを目的とする。

#### 【0010】

【課題を解決するための手段】（構成）本願の請求項1～4に係る発明は、ホトマスク上に形成されたパターンに照明光学系を介して照明光を照射し、このホトマスク上のパターンに対応して投影光学系により基板上に転写される評価パターンを測定することにより投影光学系の投影レンズの収差を測定する方法において、それぞれ以下の特徴を有する。

【0011】前記評価パターンは、基板上に転写されたパターンの周期が式1の条件を満たし且つホトマスク上でのライン幅とスペース幅がほぼ1対1である周期パターン又は基板上に転写されたパターンの周期が式2の条件を満たす周期パターンからなる第1のパターンと、この第1のパターンの1周期の幅よりもパターン幅が広い第2のパターンとを有するものであり、

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 3\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式1)$$

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 2\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式2)$$

P：第1のパターンの1周期の幅

NA：投影レンズの開口数

λ：照明光の波長

σ：照明光学系のコヒーレンスファクター

前記基板上に同時に転写された第1のパターンと第2のパターンの位置の差を求めることを特徴とする（請求項1）。

【0012】前記評価パターンは、基板上に転写されたパターンの周期が式1の条件を満たし且つホトマスク上でのライン幅とスペース幅がほぼ1対1である周期パターン又は基板上に転写されたパターンの周期が式2の条件を満たす周期パターンの少なくとも一方からなる複数種類の第1のパターンを有するものであり、該複数種類の第1のパターンはそれぞれ異なる周期の周期パターン

からなり、前記基板上に同時に転写された複数種類の第1の 패턴の位置の差を求めることを特徴とする（請求項2）。

【0013】前記評価パターンは、基板上に転写された图案の周期が式1の条件を満たし且つホトマスク上でのライン幅とスペース幅がほぼ1対1である周期パターン又は基板上に転写された图案の周期が式2の条件を満たす周期图案の少なくとも一方からなる複数種類の第1の图案を有するものであり、該複数種類の第1の图案はそれぞれ異なる周期の周期图案からなり、前記基板上に同時に転写された複数種類の第1の图案のジャストフォーカス位置のフォーカス差を求めることを特徴とする（請求項3）。

【0014】前記評価パターンは、基板上に転写された图案の周期が式1の条件を満たし且つホトマスク上でのライン幅とスペース幅がほぼ1対1である周期パターン又は基板上に転写された图案の周期が式2の条件を満たす周期图案の少なくとも一方からなる複数種類の第1の图案を有するものであり、該複数種類の第1の图案はそれぞれ異なる方向に並んだ周期图案からなり、前記基板上に同時に転写された複数種類の第1の图案のジャストフォーカス位置のフォーカス差を求めることを特徴とする（請求項4）。

【0015】（作用）実際のデバイスパターンにおいては、图案のサイズや形状の違いによって予想される転写位置と実際に転写される位置の間にずれが生じる、图案の大きさや密度によって解像できるフォーカス範囲がシフトする、图案の向きによって解像できるフォーカス範囲がシフトする等の問題が予想される。しかし、これらの問題は、投影レンズの収差、2次光源の強度むら、照明テレセンズれ、照明コヒーレンスファクター等が複雑に関わり合っているため、実際のデバイスパターンでどのような変化が生じるのかを事前に予想することが難しい。

$$P(R, \theta) = P_{ideal}(R) \exp \{ 2\pi i W(R, \theta) \} \quad (式3)$$

と表すことができる。ここで示す $W(R, \theta)$ は波面収差の収差関数と呼ばれ、瞳面上の点 $(R, \theta)$ で、波面が理想波面からどの位前後しているかを表している。ただし、 $R$ はNAで規格化されている。

【0021】この収差関数は、その解析により、ザイデルの5収差（球面収差、非点収差、コマ収差、像面わん曲、歪曲）と言われる現象に分けることができる。（式3）では、像面上の特定の位置における瞳関数として表現したが、実際の収差関数は、瞳面上の位置 $(R, \theta)$ と像面上の位置 $(r, \phi)$ の関数である。従って、ザイデルの5収差は、局所的な評価を必要とするものと、露光領域全体での評価を必要とするものに分けることができる。前者は、球面収差、非点収差、コマ収差で、後者は、像面わん曲、歪曲である。像面わん曲は、露光領域内でのフォーカス測定から、その面内分布として表現す

\*【0016】本発明では、これら諸問題の原因となる要因のうち、投影レンズの収差のみに帰着した絶対評価を短時間に高精度に行なうことが可能である。すなわち、波面収差の偶関数成分と奇関数成分を分離して測定することができ、簡単な測定と簡単な計算式によって、コマ収差、球面収差、非点収差を算出することができ、実際のデバイス图案のシミュレーションにフィードバックできる形でレンズ収差係数を算出することができ。また、特定の条件内で任意の波面収差の測定が可能となるため、従来では不可能であった高次の収差に対しても評価が可能となる。

【0017】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態を図面を参照して説明する。まず、パターン転写の基本構成と、パターン形成におけるレンズ収差の様子を説明する。

【0018】図1は、ホトマスク上のパターンを基板上に転写する様子を示した模式図である。照明光学系1によってホトマスク2を照明し、投影光学系3を介してホトマスク2上のパターンを基板4上へ転写している。

【0019】しかし、実際の投影光学系には図2に示すような収差が存在し、フォーカスずれ、图案のボケや変形、或いは位置ずれが発生する。図2において、11および15は理想波面、12および16は収差がある場合の波面、13はレンズ、14および20は結像位置、17は波面収差、18は理想光線、19は収差がある場合の光線、21は縦収差、22は横収差を表している。すなわち、収差の無い理想的な波面11および15に対して、実際の波面12および16はずれていることが考えられる。この理想波面15と実際の波面16の差が波面収差17であり、この波面収差の形状が収差関数である。

【0020】この時、投影レンズの瞳関数 $P(R, \theta)$ は、

\*

ることができる。一方、歪曲は露光領域内での転写位置ずれ分布として測定することができる。

【0022】局所的な収差（球面収差、非点収差、コマ収差）は、収差関数を級数展開で表した時の $R$ に関する各項に相当している。方向性の無い $R^4$ の項の係数は球面収差を表し、直交する2方向で $R^2$ の項の係数に差がある場合は非点収差を表している。また、 $R^3$ の項の係数はコマ収差を表している。さらに高次の係数に関しては、高次の球面収差、高次の非点収差、高次のコマ収差として表現されている。収差を評価することは、収差関数を級数展開した時の $R$ に関する各項の係数を測定することである。

【0023】本発明では、照明条件とマスク上のパターンを限定することにより、高精度な収差測定を可能にしている。ラインアンドスペースパターンによる回折光の



分布を瞳面上で図示すると、照明コヒーレンスファクター $\sigma$ との関係から、図3のように表すことができる。図3において、31は投影レンズの開口数、32は照明光学系の開口数、36は0次回折光、37、38、39はそれぞれ+1次回折光、+2次回折光、+3次回折光、35、34、33はそれぞれ-1次回折光、-2次回折光、-3次回折光を表している。照明光学系のコヒーレンスファクター $\sigma$ は、投影光学系の開口数31 ( $NA_{obj}$ ) と照明光学系の開口数32 ( $NA_{ill}$ ) より、 $\sigma = NA_{ill} / NA_{obj}$  (4)。

で表される範囲である。ただし、 $\lambda$ は照明光の波長である。

【0025】一方、ライン幅とスペース幅の比が1対1以外のラインアンドスペースパターンでは、±2次光も※

$$\lambda / \{NA(1-\sigma)\} \leq P \leq 2\lambda / \{NA(1+\sigma)\} \quad (式2)$$

で表される範囲である。

【0026】周期パターンの場合、±1次の回折光の中心が到達する瞳面上での中心からの距離Rは、パターンの周期Pに反比例するので、 $\sigma$ とPの代わりに $\sigma$ とRの関係を図4に示す。 $\sigma$ の値が0.5以上では式1を満たす条件が存在しないことがわかる。また、この領域内でパターンの周期Pが小さくなり、式2の領域に入ると、ライン幅とスペース幅の比が1対1である必要はない。これは、式2の領域では、マスクの寸法制御が必要ないことを表している。

【0027】具体的に、波長 $\lambda$ を0.248 $\mu m$  (クリプトンフロライドエキシマレーザー)、 $NA=0.6$ とすると、適用可能なラインアンドスペースパターンの周期は、図13のようになる。

【0028】ラインアンドスペースパターンを0.5以下の $\sigma$ 条件で露光することは、従来の半導体デバイスの製造ではあまり用いられていない。また、現実的な値で最も小さい0.15 $\sigma$ で考えると、0.25 $\mu m$ 以下のデザインルールの半導体デバイス製造をターゲットにしている露光装置に対して、収差評価にデザインルールよりも大きなパターンを用いることは従来にはない方法である。

【0029】式1或いは式2の条件内にあるラインアンドスペースパターンによる回折光の分布を図5に示す。0次光42と±1次光43、44は投影レンズの開口数に対応した円41の内部に存在し、各光束の内部では波面収差はほぼ一定であると仮定すると、3光束の波面収差はそれぞれ3点 ( $P-1$ ,  $O$ ,  $P+1$ ) で代表することができる。

【0030】この3点の波面収差は、デフォーカスに対して図6に示す関係が得られる。デフォーカスは、元々の波面収差の波面関数に、 $R^2$  デフォーカス量に相当する係数を掛けた項を加えることと等価であり、また、定数項を加えることは収差的には何の意味も持たない。従

\*【0024】ライン幅とスペース幅の比を1対1にしたラインアンドスペースパターンでは、回折の原理により零次以外の偶数次の回折光は存在しない。従って、このようなパターンによる回折光の次数は、 $\dots, -5, -3, -1, 0, +1, +3, +5, \dots$ となるため、0次光と±1次光の3光束のみでパターンを形成しようとする、±3次光が投影光学系の開口数 ( $NA_{obj}$ )、以降NAとする)の外側に存在し、±1次光がNAの内側に存在すればよいことになる。このような条件は、パターンの周期Pが、

※存在するため、3光束のみでパターンを形成しようすると、±2次光が投影光学系の開口数NAの外側に存在し、±1次光がNAの内側に存在すればよいことになる。このような条件は、パターンの周期Pが、

って、元々の波面収差51が如何なる形状であっても、デフォーカス52を変化させることで、0次光の波面収差53と±1次光の波面収差54、55の関係が直線状に並ぶ条件を得ることができる。この時がフォーカスが最も合った状態、即ちこのパターンに対するベストフォーカス(ジャストフォーカス)である。また、これら3点から最小2乗フィッティングした直線56の傾きがこのときのパターン位置ずれ量に比例し、この直線からの標準偏差がパターンのボケ具合を反映している。

【0031】このように、3光束のみでラインアンドスペースパターンを結像させることにより、基準フォーカス位置を予め決めておけば、基準フォーカスとジャストフォーカスとの差から、0次光の波面収差を零としたときの±1次光の波面収差の平均値を決定することができる。また、パターンの位置ずれ量から、±1次光の波面収差の差を決定することができる。

【0032】この波面収差の平均値は収差関数の偶関数成分(特に、球面収差や非点収差)を表し、波面収差の差は収差関数の奇関数成分(特に、コマ収差)を表わしている。

【0033】よく調整された投影レンズにおいては、レンズの中心付近での波面収差はほとんど零であり、リソグラフィ特性の低下の原因となる波面収差は専らレンズの周辺部に集中しているものと考えられる。従って、動径距離R(最大値は1)ができる限り大きな範囲まで含まれる条件ほど、収差評価には優れた条件であると言える。

【0034】基板上に塗布されたレジスト膜に評価パターンを転写し、このレジストパターンを用いて測定する場合は、レジストを可能な限り薄膜にした方が好ましい。超薄膜のレジストを使用することで、レジストの化学的な特性による測定結果への影響を低減し、レジストの種類によらず一定の結果が得られる利点がある。

【0035】以下、コマ収差、球面収差、非点収差の測

定についてそれぞれ説明する。まず、コマ収差の測定について説明する。図7に示すパターンを全面に配置したホトマスクをシフトさせて二重露光すると、図8に示す評価用パターンを得ることができる。1回目に露光したパターン61は幅2.0μmのパターン62と照明コヒーレンスファクターσ及び式1から限定されるラインアンドスペースパターン63で構成され、2回目に露光したパターン64はパターン62を覆うパターン65と、\*

$$W(R, \theta) = Z_1 (3R^2 - 2) R \cos \theta + Z_8 (3R^2 - 2) R \sin \theta \quad (式5)$$

で表わされる。

【0037】2.0μmパターン71の転写位置ずれは、式5の原点付近の傾きに相当するため、2.0μmパターン71に対するラインアンドスペースパターン7※

$$W_x(R) = Z_1 (3R^2 - 2) R \\ W_y(R) = Z_8 (3R^2 - 2) R \quad (式6)$$

のように表される。

【0038】大きなパターンの位置ずれ量は、式6の原点付近での傾きに相当するため、大きなパターンからの★

$$W_x(R) = Z_1 \cdot 3R^3, \quad W_y(R) = Z_8 \cdot 3R^3 \quad (式7)$$

上記式7を式6の代わりに用いる。

【0039】また、このラインアンドスペースパターン☆

$$R = \lambda / (P \cdot NA) \quad (式8)$$

で示され、その時の波面収差Wも相対位置ずれを(δx, δy)とすると、

$$(W_x, W_y) = (\delta x / 2P, \delta y / 2P) \quad (式9)$$

で表わされる。

【0040】従って、ゼルニケの3次のコマ収差を表わ◆

$$Z_1 \sim (4P^2 / 3) (NA / \lambda)^3 \delta x \\ Z_8 \sim (4P^2 / 3) (NA / \lambda)^3 \delta y \quad (式10)$$

で表すことができる。

【0041】さらに、高次の収差まで測定する為には、ラインアンドスペースパターン63の周期を式1及び式\*

$$W(R) = aR^3 + bR^5 + cR^7 + \dots \quad (式11)$$

に最小自乗フィッティングを行なうようにすればよい。

【0042】次に、球面収差の測定について説明する。図10に示すパターンを露光量を固定したままマイクロステップで徐々にフォーカス位置を変えながらレジストを塗布した基板上に露光する。このパターンは、照明コヒーレンスファクターσと式1から限定される範囲内で、周期の異なる2種類のパターン(小さい方の周期をP<sub>1</sub>とし、大きい方の周期をP<sub>2</sub>とする)で構成され、それぞれ縦と横に並んだパターンとなっている。露光量は、すべてのパターンでライン幅とスペース幅の比が1対1に形成される露光量よりもやや少ない値に設定する。

【0043】このようにして作製した試料をSEMを用いて測定すると、各パターンのスペース幅は、フォーカスの変化に従い極大値を持ち、±デフォーカスに対して対称な変化が観測される。この傾向は、照明コヒーレンスファクターを小さく設定するほど、或いはレジスト膜

\*ラインアンドスペースパターン63の一部分を覆うパターン66で構成されている。図8に示す評価パターンに対しては、通常の重ね合せ評価装置を用いて、外側の2.0μmパターン71とラインアンドスペースパターン72の相対的な転写位置ずれ量を測定することができる。

【0036】ゼルニケ(Zernike)多項式での3次コマ収差Z<sub>1</sub>及びZ<sub>8</sub>は

※2の相対的な転写位置ずれ量に相当する収差関数は、式5の原点での傾きを零とした式で表される。このときの直行する2方向での収差関数は、

★相対位置から収差を測定するためには、式6の原点での接線を式6から引いた形を用いると都合がよい。したがって、

☆に対する動径距離Rは、以下に示す周期Pの関数

◆す係数は、

30 \* 2に示す条件内で変えた複数の評価パターンを用意し、測定結果を以下の式

厚を薄くするほど顕著になることがわかっている。このスペース幅の寸法変動をフォーカス位置に対する2次関数で最小自乗フィッティングし、その極大値をこのパターンに対するジャストフォーカスとして決定することができる。デフォーカス時の寸法変動は、必ずしも±デフォーカスで対称に変化するとは限らない。むしろ一般的には対称に変化しない。しかし、σを小さくすると±デフォーカスでの寸法変動の対称性が増す傾向がある。この現象は図5と図6を用いると容易に理解することができる。

【0044】周期パターンによる回折光は、瞳面でそれぞれの回折次数に対応し、照明σと同一形状の回折光分布を持つ。0次光と±1次光の三光束のみで転写パターンが結像される場合、各回折光において照明σ形状内で波面収差がほぼ一定であると仮定すると、各回折光を代表する点O、点P+1、点P-1での波面収差はフォーカス位置の変化に伴い、図6に示すような変化を示す。即

ち、どこかのフォーカス位置で点O、点P+1、点P-1の3点の波面収差は必ず直線状に並び、±デフォーカスに伴い点P+1と点P-1の波面収差が対称に変化する。この直線状に並んだ時のフォーカス位置がジャストフォーカスである。また、パターンが解像するフォーカスの範囲で表わされるフォーカス裕度は、パターンの周期が大きくなるほど急激に広がる。すなわちこれは、パターンが大きくなるとジャストフォーカス決定精度が急激に低下することを表わしている。しかし、σを小さくしてゆくと、ジャストフォーカス位置でのパターンコントラストは増加するが、フォーカス裕度が狭くなる傾向がある。このようにσを小さく設定することによって、ジャストフォーカス位置の決定精度は良くなることがわかる。例えば、シミュレーションによると、σを0.15とした場合、測定可能なパターン周期の最大値は約0.95 μmであると言える。

【0045】また、パターンが解像するフォーカスの範囲で表わされるフォーカス裕度は、パターンの周期が大きくなるほど急激に広がる。すなわちこれは、パターンが大きくなるとジャストフォーカス決定精度が急激に低下することを表わしている。しかし、σを小さくしてゆくと、ジャストフォーカス位置でのパターンコントラストは増加するが、フォーカス裕度が狭くなる傾向がある。このようにσを小さく設定することによって、ジャストフォーカス位置の決定精度は良くなることがわかる。例えば、シミュレーションによると、σを0.15とした場合、測定可能なパターン周期の最大値は約0.95 μmであると言える。

【0046】ゼルニケ多項式での4次の球面収差Z<sub>9</sub>は

$$W(R) = Z_9 \cdot (6R^4 - 6R^2 + 1) \quad (式12)$$

で表される。

【0047】しかし、フォーカス差から収差を評価しよう

$$W(R) = Z_9 \cdot 6R^4 + C$$

上記式13を式12の代わりに用いると都合がよい。ただし、Cは任意定数である。

【0048】一方、図11に示すように、周期P<sub>1</sub>のラインアンドスペースパターンに対する±1次光の動径距★

$$\begin{aligned} (NA^2 / 2\lambda) \delta_1 R_1^2 &= 6Z_9 R_1^4 + C \\ (NA^2 / 2\lambda) \delta_2 R_2^2 &= 6Z_9 R_2^4 + C \end{aligned} \quad (式14)$$

という関係が得られる。

【0049】測定されたフォーカス差がδ<sub>F</sub> = δ<sub>2</sub> - δ<sub>1</sub>★

$$Z_9 = (\delta_F / 12\lambda) (NA^2 / (R_2^2 - R_1^2)) \quad (式15)$$

で表すことができる。

【0050】さらに、高次の収差まで測定する為には、ラインアンドスペースパターンの周期を式1或いは式2◆30

$$W(R) = aR^4 + bR^6 + cR^8 + \dots \quad (式16)$$

に最小自乗フィッティングすることで可能である。

【0051】次に、非点収差の測定について説明する。図12に示すパターンを露光量を固定したままマイクロステップで徐々にフォーカス位置を変えながらレジストを塗布した基板上に露光する。このパターンは、照明コヒーレンスファクターσと式1或いは式2から限定され\*

$$W(R, \theta) = Z_5 \cdot R^2 \cos 2\theta + Z_6 \cdot R^2 \sin 2\theta \quad (式17)$$

で表わされる。

【0053】球面収差の測定の際と同様に、各方向のパターンでのジャストフォーカス位置を測定し、縦パターン※

$$\begin{aligned} Z_5 &= (\delta F_5 / 4\lambda) (NA^2) \\ Z_6 &= (\delta F_6 / 4\lambda) (NA^2) \end{aligned} \quad (式18)$$

で表わすことができる。

【0054】さらに、高次の収差まで測定する為には、★

$$W(R) = aR^2 + bR^4 + cR^6 + \dots \quad (式19)$$

に最小自乗フィッティングすることで可能である。

【0055】以下、本発明の幾つかの具体例について説明する。まず、第1の具体例について説明する。クリプトンフロライドエキシマレーザー光を光源とし、投影レ

※うと試みるには、式12の第2項、すなわちR<sup>2</sup>の項はフォーカスと区別が付きにくいと、

(式13)

★離を±R<sub>1</sub>、周期P<sub>2</sub>のラインアンドスペースパターンに対する±1次光の動径距離±R<sub>2</sub>、測定されたフォーカス位置をδ<sub>1</sub>、δ<sub>2</sub>とすると、

☆であるため、式14からZ<sub>9</sub>は以下の式

◆に示す条件内で変えた2種類以上の評価パターンを用意し、測定結果を以下の式

※る周期パターンを縦に並べたパターン111、横に並べたパターン112、斜め45度方向に並べたパターン113、斜め-45度方向に並べたパターン114で構成されている。

【0052】ゼルニケの非点収差を表わすZ<sub>5</sub>、Z<sub>6</sub>の項は以下の式

※ン111と横パターン112のフォーカス差をδF<sub>5</sub>、+45度パターン113と-45°パターン114のフォーカス差をδF<sub>6</sub>とすると、Z<sub>5</sub>、Z<sub>6</sub>は

★パターンの周期を式1に示す条件内で変えた複数種類の評価パターンを用意し、測定結果を以下の式

レンズの開口数NAが0.6の露光装置を用い、照明光学系のコヒーレンスファクターσを0.3として、図7に示すパターンを全面に配置したホトマスクを用いて露光位置をシフトさせて二重露光した。反射防止膜(シプレ

一製AR3)を60nm厚で塗布し、ポジ形ホトレジスト(JSR製S210J)を0.3μm厚で塗布したウエハ基板上に、パターン61を露光量16mJ/cm<sup>2</sup>で露光し、続けてパターン64を重ねて露光量10mJ/cm<sup>2</sup>で露光し、二重露光後に0.21規定のTMAH現像液を用いて現像を行い、図8に示す評価用パターンを得た。

【0056】この評価パターンは、横25mm×縦8mmの露光領域内で33点(11×3)用意されており、通常のオーバーレイ検査装置を用いて測定した。その結果を図9に示す。位置ずれベクトルは最大20nmを示した。この最大値 $\delta x = 20\text{nm}$ を式9に代入し、本露光装置のコマ収差を0.12λと算出できた。

【0057】次に、第2の具体例について説明する。反射防止膜(シプレー製AR3)を60nm厚、ポジ型ホトレジスト(JSR製S210J)を0.3μm厚で塗布したウエハ基板上に、図10に示すパターンを露光量10mJ/cm<sup>2</sup>で固定したままマイクロステップで露光した。具体的には、クリプトンフロライドエキシマレーザー光を光源とし、投影レンズの開口数NAが0.6の露光装置を用い、照明光学系のコヒーレンスファクター $\sigma$ を0.15として、フォーカスを0.01μmずつ変化させながら露光した。10mJ/cm<sup>2</sup>の露光量は、0.30μmラインアンドスペースパターンや0.45μmラインアンドスペースパターンを1:1で形成する露光量よりもやや少なめである。

【0058】SEMを用いてスペース幅を測長し、フォーカス変化による寸法変動をフォーカス位置に対する2次関数で最小自乗フィッティングし、その極大値をこのパターンに対するジャストフォーカスとした。全種類のパターンでジャストフォーカスを比較すると、パターン91とパターン92のジャストフォーカスの平均値とパターン93とパターン94の平均値の差 $\delta F$ が120nmであった。この測定結果を式15へ代入することによって、 $Z_9$ は0.02λと計算することができた。

【0059】次に、第3の具体例について説明する。反射防止膜(シプレー製AR3)を60nm厚、ポジ型ホトレジスト(JSR製S210J)を0.3μm厚で塗布したウエハ基板上に、図12に示すパターンを露光量10mJ/cm<sup>2</sup>で固定したままマイクロステップで露光した。具体的には、クリプトンフロライドエキシマレーザー光を光源とし、投影レンズの開口数NAが0.6の露光装置を用い、照明光学系のコヒーレンスファクター $\sigma$ を0.15として、フォーカスを0.01μmずつ変化させながら露光した。

【0060】ジャストフォーカス位置を測定した結果、縦パターン111と横パターン112のフォーカス差 $\delta F_5$ は60nmで、+45度パターン113と-45度パターン114のフォーカス差 $\delta F_6$ は80nmであった。この測定結果を式18に代入して、それぞれ $Z_5 =$

0.02λ、 $Z_6 = 0.03\lambda$ と算出できた。

【0061】以上、本発明の実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されるものでなく、その趣旨を逸脱しない範囲内において種々変形して実施することが可能である。

#### 【0062】

【発明の効果】本発明によれば、簡単な測定と簡単な計算式によって、コマ収差、球面収差、非点収差を算出することができ、投影レンズの収差のみに帰着したレンズ収差の絶対評価を短時間で高精度に行なうことが可能となる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】ホトマスク上のパターンを基板上に転写する様子を模式的に示した図。

【図2】投影レンズの波面収差と基板上の光線がずれる様子を模式的に示した図。

【図3】投影レンズの瞳面上におけるレンズの開口数とコヒーレンスファクター $\sigma$ のときの回折光の関係を示した図。

20 【図4】本発明において式1及び式2の条件を満たす範囲を示した図。

【図5】本発明における瞳面上での回折光について示した図。

【図6】本発明における波面収差とフォーカス位置との関係を模式的に示した図。

【図7】本発明のコマ収差の測定に用いるホトマスク上のパターンを示した図。

【図8】図7のパターンを用いて形成されたパターンを示した図。

30 【図9】コマ収差の測定結果における位置ずれ分布について示した図。

【図10】本発明における球面収差の測定に用いるホトマスク上のパターンを示した図。

【図11】図10のパターンを用いて測定されたフォーカス位置が示す波面収差と球面収差との関係について示した図。

【図12】本発明における非点収差の測定に用いるホトマスク上のパターンを示した図。

40 【図13】コヒーレンスファクター $\sigma$ に対するラインアンドスペースパターンの適用可能な周期の範囲について示した図。

#### 【符号の説明】

1…照明光学系

2…ホトマスク

3…投影光学系

4…基板

11、15…理想波面

12、16…収差がある場合の波面

13…レンズ

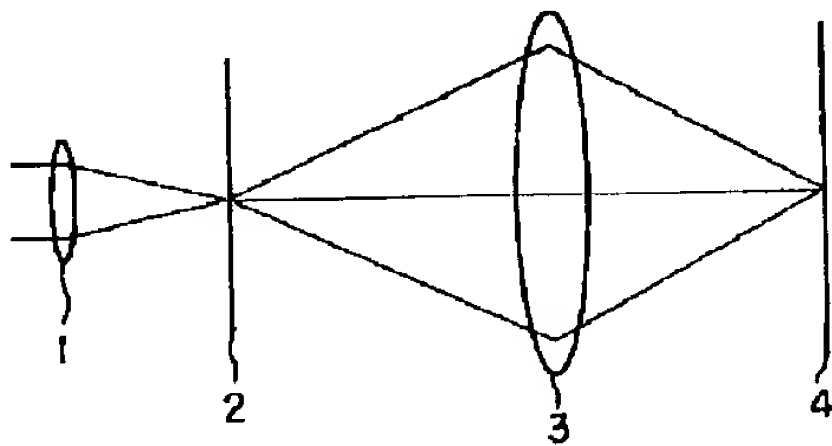
50 14、20…結像位置



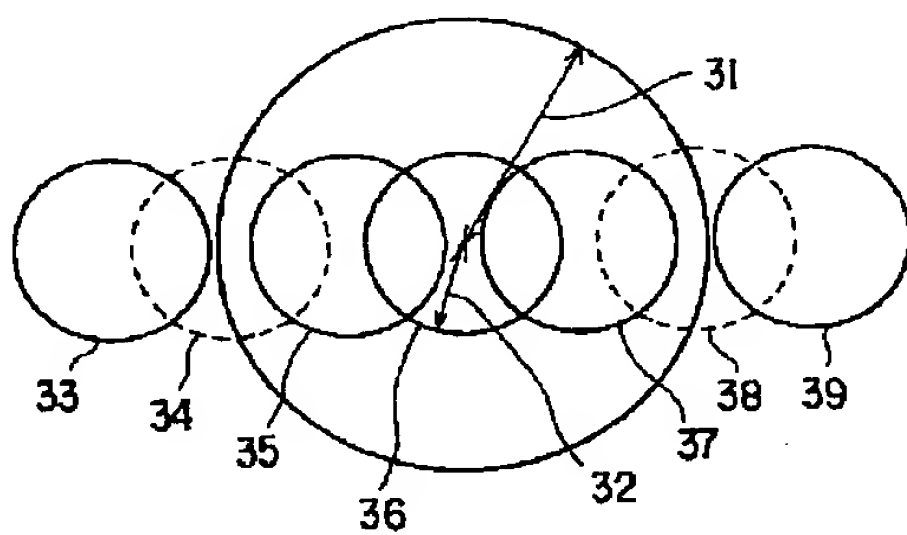
15

- 17…波面収差
- 18…理想光線
- 19…収差がある場合の光線
- 21…縦収差
- 22…横収差
- 31、41…投影レンズの開口数
- 32…照明光学系の開口数
- 33…-3次回折光
- 34…-2次回折光
- 35、44…-1次回折光
- 36、42…0次回折光
- 37、43…+1次回折光
- 38…+2次回折光
- 39…+3次回折光
- 51…収差関数

【図1】



【図3】



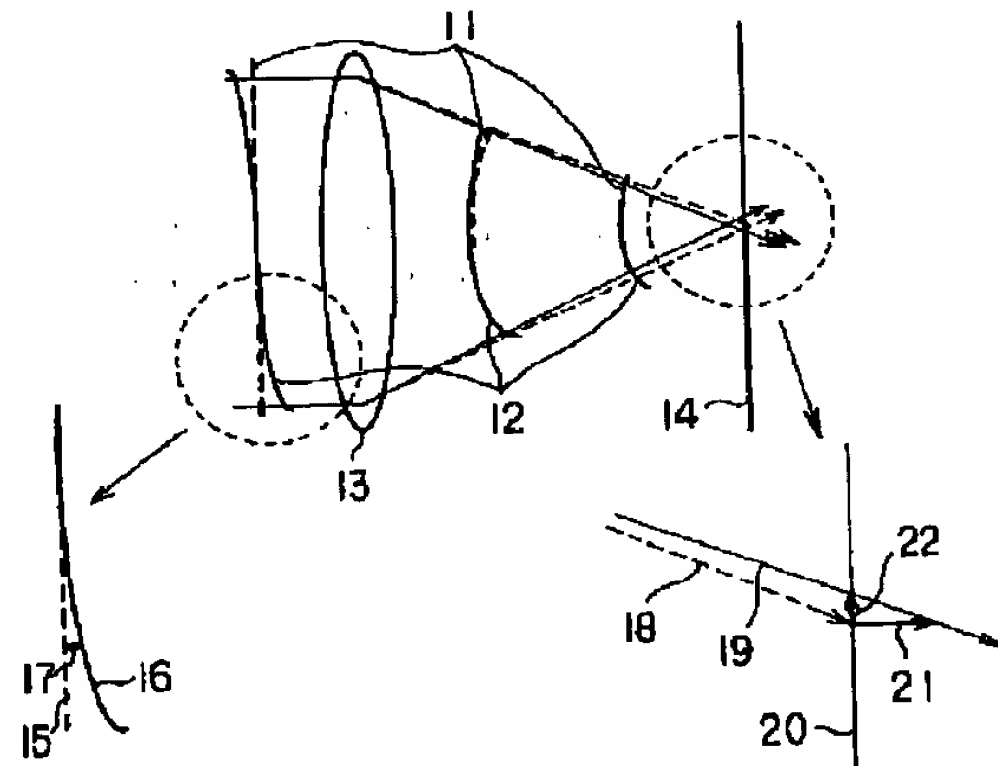
【図9】



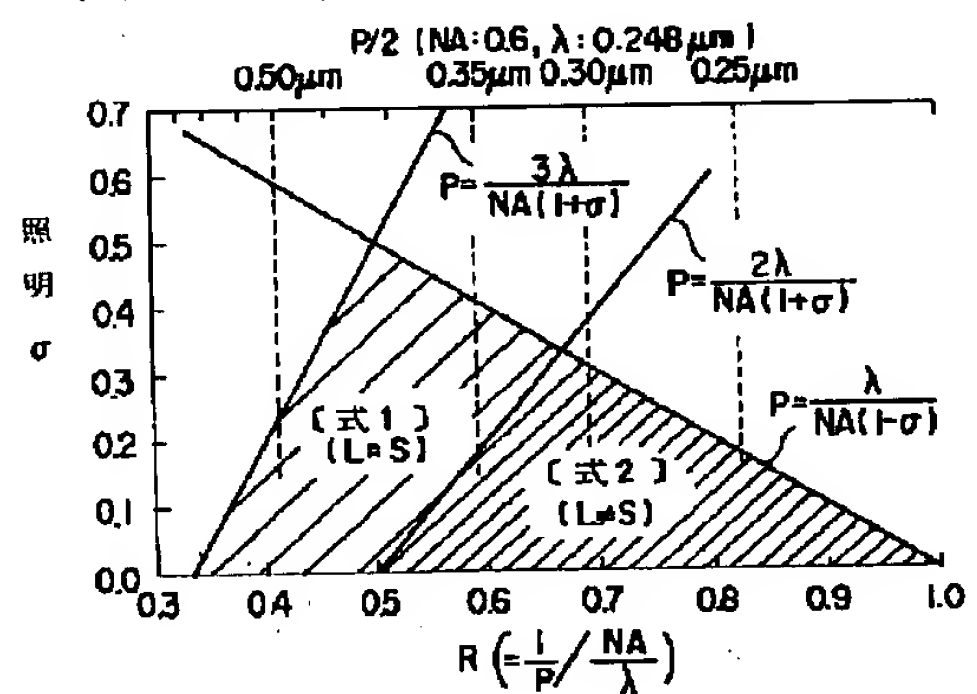
16

- 52…デフォーカスを表す収差関数
- 53…0次回折光の波面収差
- 54…+1次回折光の波面収差
- 55…-1次回折光の波面収差
- 61…1回目の露光パターン
- 62、71…大きいパターン
- 63…ラインアンドスペースパターン
- 64…2回目の露光パターン
- 65…パターン62を覆うパターン
- 10 66…パターン63の一部を覆うパターン
- 72…パターン63の一部分のパターン
- 91、91、93、94…ラインアンドスペースパターン
- 111、112、113、114…ラインアンドスペースパターン

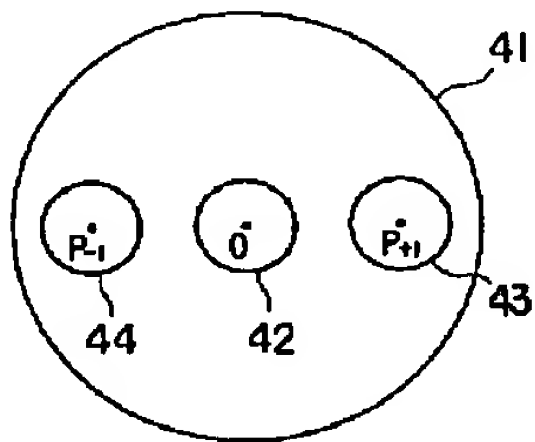
【図2】



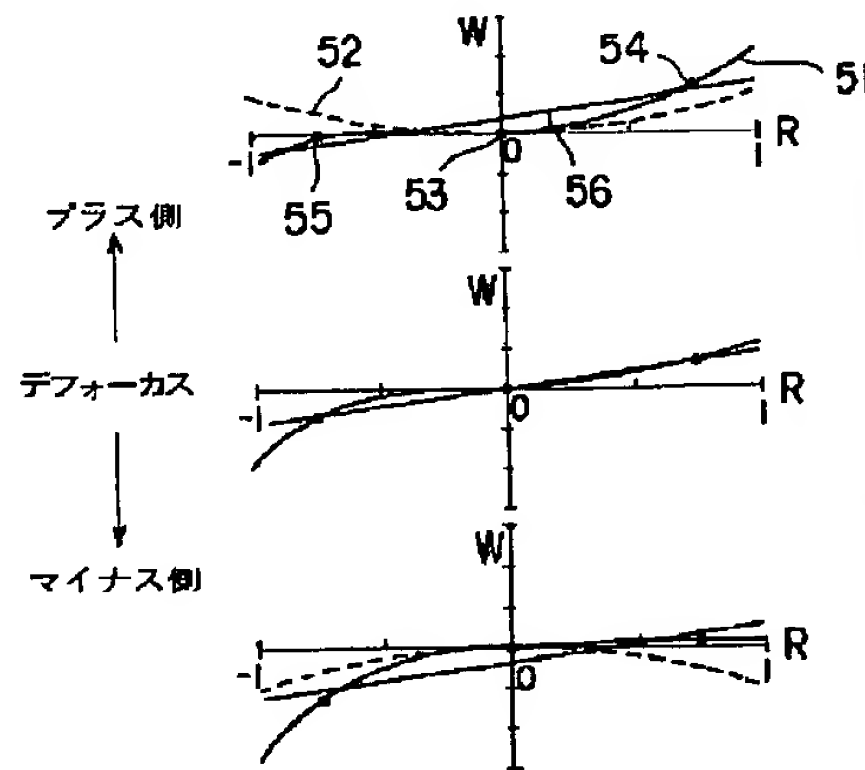
【図4】



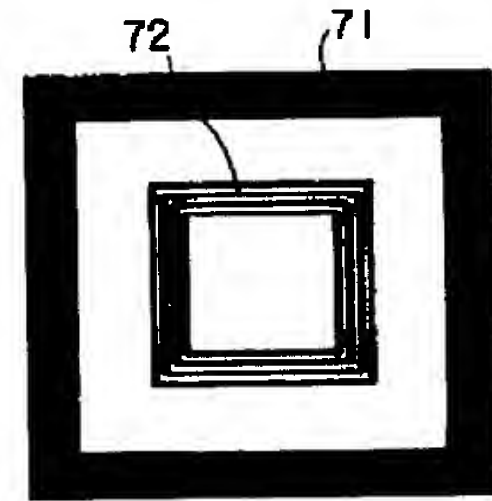
【図 5】



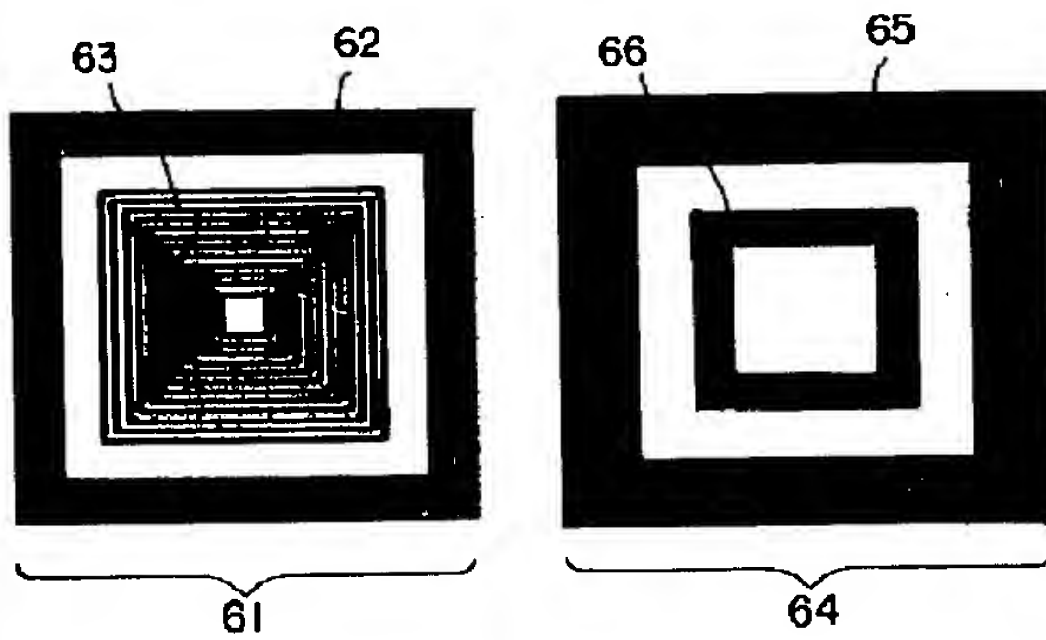
【図 6】



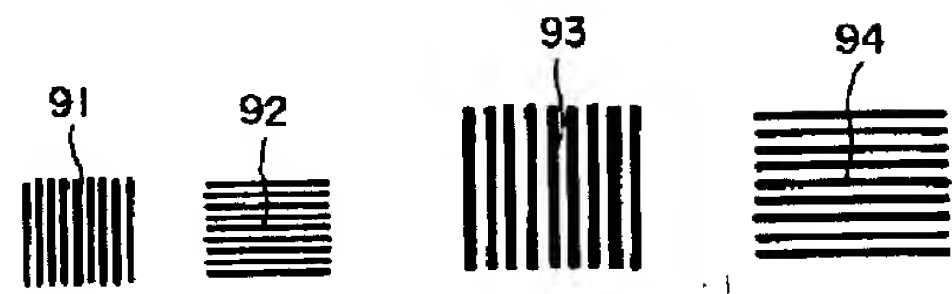
【図 8】



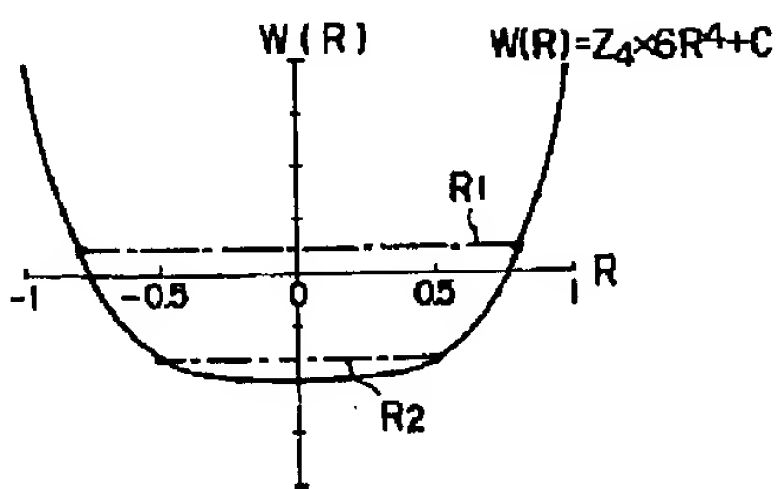
【図 7】



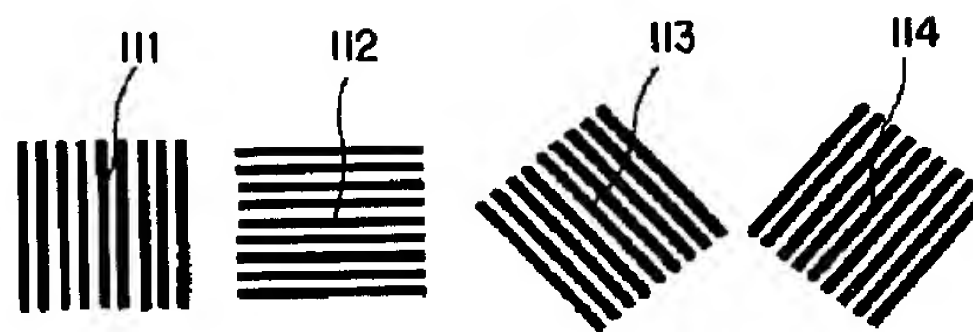
【図 10】



【図 11】



【図 12】



【図 13】

NA = 0.6 ,  $\lambda = 0.248 \mu\text{m}$  の場合

照明 $\sigma$	周期 / 2 (最小 - 最大)
0.75	(該当なし)
0.45	0.375 - 0.428 $\mu\text{m}$
0.3	0.295 - 0.477 $\mu\text{m}$
0.15	0.243 - 0.540 $\mu\text{m}$